

Reconfiguration of Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)

Kazuhiko HASEGAWA (*Member*),

Tadanori TAKIMOTO (*Member*) and Isamu HAYAKAWA

船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES)の再構築

正会員 長谷川 和彦*

正会員 滝本 忠教**、早川 勇***

Keywords : *Automatic Navigation, Expert System, Fuzzy System, Collision Avoidance, Guidance Control, Decision Making*

It has passed 10 years since the first author and others have engaged in the research of automatic navigation system. It was started from automatic collision avoidance system (ACAS) treating with only but various two-ships encounters. Soon after it was expanded to an expert system called SAFES (Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System), in which any situation with multiple ships can be solved. At the same time, simulation programme called SMARTS (each-Ship-with-captain Marine Traffic Simulation) was developed for the purpose of the system verification and evaluation. Apart from its primary purpose, it was found to be used as a realistic marine traffic generator and rather utilised for various applications such as 1) automatic background traffic generator in ship handling simulator (intelligent ship handling simulator) and 2) evaluation of specified waterways for safety assessment or waterway design (so-called micro simulation). Both systems was reconfigured and rewritten by real-time simulation language G2.

1. 結 言

著者らが自動航行システムの研究に従事して10年が立った。当時はちょうど、ファジィ理論や人工知能(AI)研究が盛んに行われ始めた頃で多くの研究者がこれらの基礎研究や応用研究に従事した。船舶工学の分野でもちょうど運輸省主導の超自動化船プロジェクトが始まったころであった。

しかし、ファジィ理論は日本ではむしろ一般消費者の興味をそそる宣伝材料として使われた傾向が家電メーカーを中心に多くあり、真にファジィ理論がその特性を活か

して使われたケース(クーラ、洗濯機、掃除機など)もあったのに単にブームとして終わってしまった。

一方の人工知能研究も一時はこれですべての知的仕事はコンピュータで解決できるとか、コンピュータが考えることができる、といった過誤があり、人工知能を過信するものと逆に警戒するものに二分された。また、AI研究を推進する人達の中にも推論エンジンや自動知識獲得ツールの開発などに興味に移り、実際に応用されるケースは地道な知識獲得が必要で多くの研究者の興味は薄れていった。

船舶工学の分野においては、造船 CIM プロジェクトが

* 大阪大学工学部

** 船舶技術研究所(研究当時、大阪大学大学院工学研究科)

*** 松尾橋梁(株)(研究当時、大阪大学工学部)

日本造船研究協会、日本造船工業会のプロジェクトを経て、現在は各造船所において開発が進められているのに比べ、超自動化船プロジェクトは一応、運輸大臣を招いた模型実験や汐路丸を使った実船実験まで成功裏に終了したものの、実用化のめどは立っていない。その理由は現実問題として実際の海域をほんの一握りの自動化船が対処できる状況になるにはまだまだ知識ベースが十分でない上に、各種センサーの精度や価格、法制度の改正、船員組合との調整など周辺の状況が整っていないなどの障害が多いからである。

著者はこの 10 年間一貫してこのシステムに拡張や改良を加えるとともに、このシステムを単なる自動航行システムとしてではなく、このシステムの検証・評価のために作成したシミュレーションプログラムを新しい応用分野へ適用する可能性について種々検討してきた。このたび、リアルタイムシミュレーション言語 G2 を用いて再構築したのを機に今まで断片的に述べてきたシステムをその後の拡張や改良点を含めて改めて総括し、概説する。

2. 自動航行システム SAFES の開発履歴

この研究の始めは避航問題へのファジィ理論の適用であった^{3),4),9),8)}。AI 研究が始まる前であったのでプログラムは FORTRAN77 を使用した。これらの研究で任意の 2 船の見合い関係において衝突危険度の判定、避航動作の決定ならびに決定した避航経路への誘導制御がファジィ理論により人間とほぼ同等の判断により行えることがわかった。同様の研究が岩崎ら²⁾によってもほぼ同時期に行われているが、他のほとんどの研究者らはファジィ理論を用いないで同様のことを行っている。この辺の経緯は文献²¹⁾に詳しいので省略する。以後のシステムにおいてもこの基本部分は一貫して使用している。ただし、メンバーシップ関数などの定義はその後、無次元化を行って船の大きさや狭水路などの航行域にあわせて変化するように改良している²⁴⁾。

次に、エキスパートシステムへの拡張を小山ら⁵⁾にならって行った^{9),10),18)}。ただし、言語は OPS83 を使用した。この段階で狭水路に適用するための拡張と海上交通シミュレーションのための交通流発生機構の付加を行った。この段階よりこのシステムを SAFES (Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System)と呼んでいる。このシステムはひとつは宮ノ窪瀬戸の航路整備計画¹²⁾にもうひとつは備讃瀬戸航路の拡幅計画¹³⁾に適用した。これまでは簡単な航行船舶の諸元から航路幅などを決めていた¹⁾りか、ネットワークシミュレーション¹⁴⁾またはマイクロシミュレーション¹⁷⁾と呼ばれる手法が用いられてきたが、エキスパートシステムによる海上交通シミュレーションが実際の航行アセスメントに適用された初めてのケースで

あろう。この海上交通シミュレーション手法を SMARTS (each-Ship-with-captain Marine Traffic Simulation)と呼ぶ^{7),20)}。

そして、これらのシミュレーションの経験から、操縦性研究における操船者を含めたシミュレーションの必要性¹⁹⁾、操船シミュレーションにおける新しいシミュレーション手法のインパクト²¹⁾、そして、航路設計における避航を考慮した交通流シミュレーションの重要性¹⁵⁾を主張してきた。

一方、操船シミュレータの分野でも他船の交通流を自動発生させ、かつ、自船の動きに応じて行動するインテリジェント操船シミュレータの提案¹⁶⁾を行った。

その後、さらに現実的な狭水路の航行環境に対応するように知識ベースの充実を図り^{23),24),25)}、最後に複数船の避航にグループ化という概念を導入して²⁶⁾、最新の SAFES を構成する要素がすべてそろった。そこで、リアルタイムシミュレーション言語 G2 を用いて全面的に書き換えた。

今後は、知識ベースの整理、拡充の他、さらに他のアプリケーションへの適用²⁷⁾、センサー (GPS、レーダ、ARPA、ECDIS など) との連携、高速化と PC 移植 (現在は UNIX マシンおよび Pentium もしくは Alpha マシン上で同一プログラムがほぼ同様に動作することが確認されている) といった作業が残されている。

3. 避航動作

3.1 避航相手の特定

3.1.1 衝突危険度

文献²⁴⁾において、衝突危険度 CR は無次元化した $TCPA$ および $DCPA$ を用いたファジィ推論を提案したが、危険に至る時間には船の大きさによる感覚の差はないことから $TCPA$ は有次元のまま使用することにした。一方、 $DCPA$ については確かに船の大きさによって危険に至る距離感には差があるものの小さい船が義務船で大型船が権利船の場合、大型船が先に避航してしまうことがあるため、見合い関係にある 2 船において大きい方の船の長さを用いて無次元化することにした。すなわち、

$$DCPA' = DCPA / L_{ref} \quad (1)$$

ただし、 L_{ref} は 2 船のうちの長い方の船の船長である。修正された $TCPA$ のメンバーシップ関数を Fig. 1 に示す。 $DCPA$ については文献²⁴⁾の Fig. 2 を CR のメンバーシップ関数およびファジィ推論則については文献³⁾の Fig. 5 および Table 2 をそのまま用いる

3.1.2 避航開始

まず、自船とある限界距離 (ここでは 30 船長) より近い船に対して常時衝突危険度 CR を計算する。自船が避航義務船 (義務船) である場合、衝突危険度 CR が義務

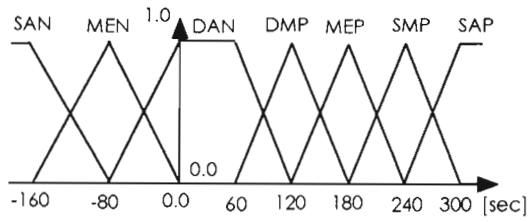


Fig. 1 Membership function of TCPA

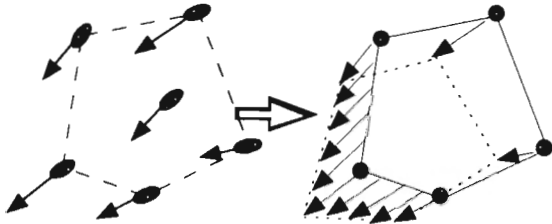


Fig. 2 Representation of "an island" of grouped ships

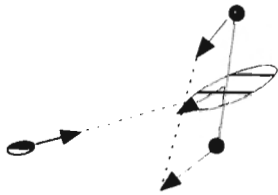


Fig. 3 False-ship to represent grouped ships

船判定値0.7を越えた時、そして、自船が針路保持船（権利船）である場合、衝突危険度CRが権利船判定値0.85（文献²⁴⁾では0.9）を越えた時、避航を開始する。

該当する他船が複数存在する時はもっとも危険度が高い船を避航対象船とする。

ただし、今回の拡張では、島影などに入っている他船についてはレーダによる認識ができないので危険度の計算を行わない。

3.1.3 相手船のグループ化

このようにして特定された避航対象船を中心としてその近くの船に対して文献²⁶⁾で提案したグループ化度を計算し、グループ化度の高い船に対してグループ化を行う。その際、グループを包絡する「島」は避航対象船と同じ速度で同じ方向に進むのではなく、辺上のすべての点において各頂点にいる船の速度ベクトルで内挿することにした（Fig. 2）。実際には自船とその「島」との交点にある False-ship（3.2.3 参照）を避航対象船とみなすことになるのですべての辺上での速度ベクトルを求める必要はない。また、この False-ship は船長をグループを構成

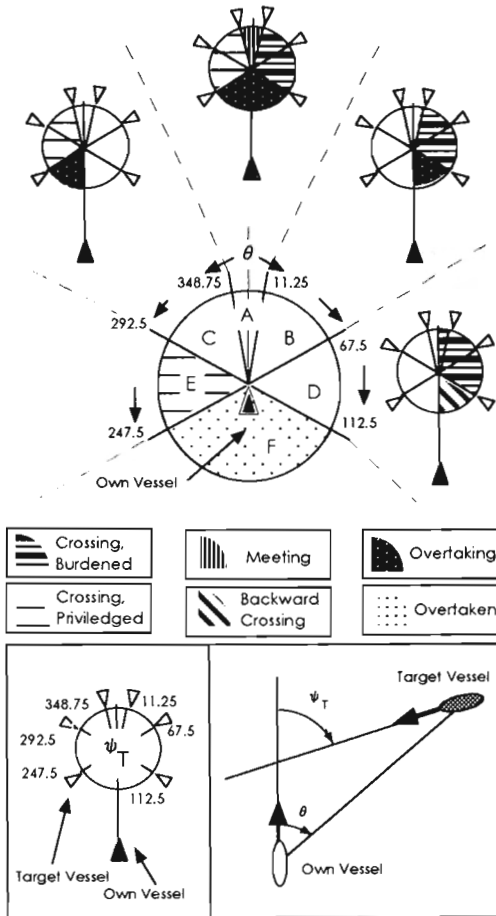


Fig. 4 Patterns of encounter situations

するすべての船の船長の合計とした（Fig. 3）。

なお、自船を含む他船のグループ化については 3.2.2 の方法により対処できるので、行わなかった。

3.2 避航形態

3.2.1 見合いの定義と避航形態

避航の形態は2船の見合い関係によって変わる。文献^{3),4)}では相手船との見合い相対角度により Type 0 から IV に分けたが、現在は文献¹¹⁾にならって、相手船の見合い角（自船船首方位から見た相手船の方位、Fig. 4 参照） θ および相手船との出合い角（自船船首方位と相手船船首方位のなす角、Fig. 4 参照） ϕ_r

$$\phi_r = \phi_T - \phi_0 \quad (2)$$

ただし、

- ϕ_0 : 自船の方位
- ϕ_T : 相手船の方位

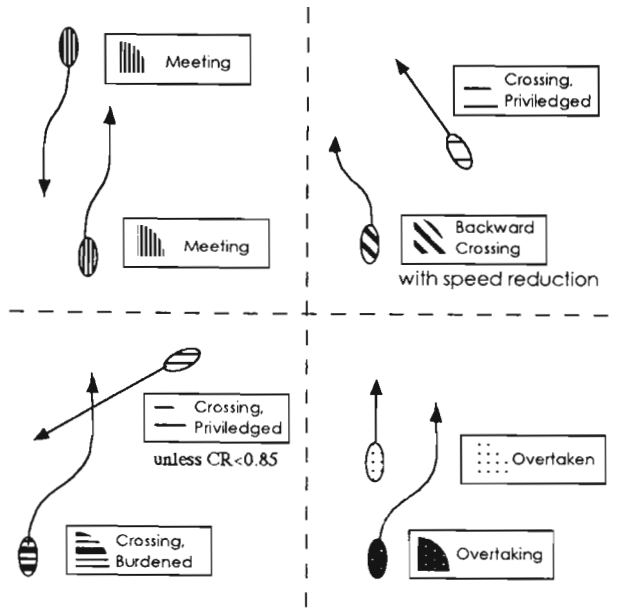


Fig. 5 Collision avoidance actions in 6 patterns

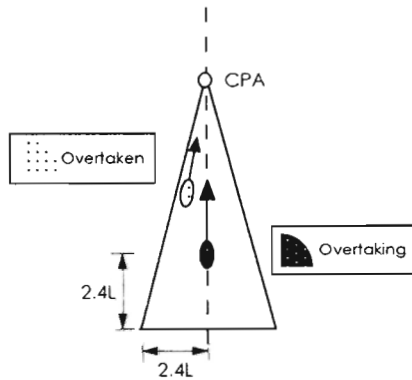


Fig. 6 Definition of overtaking triangle

により 12 ケース、6 パターンに分類した。Fig. 4 にその分類を図示する。そして、Fig. 5 に分類した 6 パターンについてそれぞれ、文献^{3),4)}で述べた避航動作を行う。なお、文献^{3),4)}における CR を ACR (Action Collision Risk)、 CR^* を VCR (Virtual Collision Risk) と再定義する。ただし、追越しの状況において 2 船の速度差が僅少の場合、文献^{3),4)} で述べた方法では $TCPA$ がきわめて大きくなり危険に気づくのが遅くなる。そこで追越しの場合のみ、Fig. 6 に示すような自船を中心として避航開始時点において求めた CPA (最接近点) を頂点とした二等辺三角形を考え、この三角形を自船に固定して移動させながら Fig. 7 に示すような避航を行う。

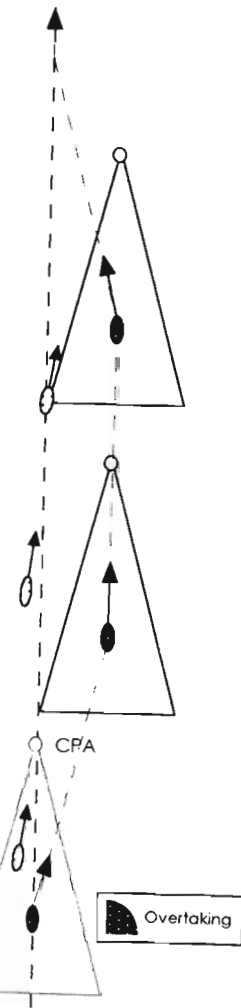


Fig. 7 Collision avoidance of overtaking

3. 2. 2 第 3 船に対するルール

避航したい相手船に対して上述した避航の初期動作が定まるとそれを仮決定する。そして、仮決定した針路や速度に対してもう一度まわりの相手船に対して衝突危険度 ACR を求め、新たな危険が生じないかを確認する。そして、その危険がなければ仮決定した行動を実際にとる。しかし、新たな危険が生じるようであればその行動に対する船速をさらに減速する。これは自船とほぼ同じ方向に進む他船が自船の右舷側にいる時に有効なルールとなる。

また、自船が追越しの状況では追越す相手船がさらに第 3 船を追越し中であれば追越しを行わず (二重追越しの禁止) その船の速度に合わせ、その船が追越しを終わるまでついていく。

こうした第3船に対するルールの追加と上のグループ化により、より現実的で合理的な避航計画をとることができる。

3.2.3 航路や陸地との避航

文献^{9),18)}で提案した False-ship という架空の船を自船の針路方向と航路境界との交点におき、その False-ship との衝突危険度 *BCR* (Bank Collision Risk) および次々変針点に到達したと仮定したときの False-ship との衝突危険度 *VBCR* (Virtual Bank Collision Risk)、そして、自船と航路境界までの距離 d_B (文献^{9),18)}ではそこにも False-ship を配置したが、実質的にはこれで十分) をもとにして避航を行う。詳しくは文献^{24),25)}を参照のこと。

4. 適用例

こうして拡張された新しい SAFES は海上交通シミュレーションプログラム SMARTS とともにリアルタイムシミュレーション言語 G2 により書き換えられた。Fig. 9 に新しい SMARTS の設定画面を示す。ここでは、船舶の

自動発生もできるし、あらかじめ決められた船舶のみのシミュレーションも行えるようになっている。また、シミュレーション後の評価のためニアミス回数などの統計処理も行えるようになっている。

Fig. 9 に文献^{9),17),23),25)}でも扱った宮ノ窪瀬戸に本システムを適用した例を示す。これは新しい SAFES を用いた 12 時間のシミュレーション結果である。航行船舶数 75 隻のうち、ニアミス 18 回、衝突 5 組、航路逸脱 3 回であり、今回より追加した衝突危険度により色分けした危険度マップも合わせて示す。

5. 結論

本論文における結論をまとめる。

- 1) 船舶自動航行システム SAFES を再構築した。
- 2) 海上交通シミュレーションプログラム SMARTS に新しい SAFES を取り込み、SAFES の検証および航行環境評価のための機能追加と改良を行った。
- 3) 両システムの開発にリアルタイムシミュレーション言語 G2 を用いたが、SAFES や SAMRTS のような複雑なシステムの構築にも拡張性があり、知識ベースの可読性(readability)にも優れている。
- 4) 今後、このシステムを用いた航行環境評価などへの応用が期待できる。

なお、本研究の遂行にあたり、歴代 SAFES の開発に寄与された引用文献の共著者に謝意を表す。また、研究費の一部に文部省科学研究費補助金を使用した。

参考文献

- (1) PIANC, ICORELS Committee No. IV, 1980, PIANC Bulletin, No.35.
- (2) 岩崎寛希、原 潔、1986、航論、第 70 号。
- (3) 長谷川和彦、上月明彦、1987a、関船誌、第 205 号。
- (4) Hasegawa, K., 1987b, Proc. 8th Ship Control Systems Symposium (SCSS), Vol.2, The Hague, The Netherlands.
- (5) Koyama, T. and Y. Jin, 1987, *ibid.*, Vol.3.
- (6) 長谷川、上月、1987c、13 回システムシンポジウム、計測自動制御学会(SICE)、沖縄。
- (7) 長谷川、1989a、日本航海学会第 80 回学術講演会前刷集。
- (8) Hasegawa, K., 1989b, Proc. 3rd Intern'l Fuzzy Systems Associ. Congress (IFSA), Seattle, U.S.A.
- (9) 長谷川他、1989c、船論、第 166 号。
- (10) 長谷川他、1989d、SICE 関西支部シンポジウム、SICE、大阪。
- (11) 二門良和、1990、神戸商船大学修士論文。
- (12) 長谷川 (部分執筆)、1990a、1991、昭和 63 年度および平成元年度宮ノ窪瀬戸航路整備調査報告書、神戸海難防止研究会。
- (13) 長谷川 (部分執筆)、1990b、昭和 63 年度備讃瀬戸航路再点検調査報告書、神戸海難防止研究会。
- (14) Kuroda, K. et al., 1990, Proc. 27th International Navigation Congress (PIANC), Osaka, Japan.
- (15) Hasegawa, K., 1990c, Oral Contribution, Section II-1, *ibid.*
- (16) Kose, K., K. Hasegawa *et al.*, 1990d, Proc. MARSIM & ICSM 90, Tokyo, Japan.
- (17) Nagasawa, A., 1990, *ibid.*
- (18) Hasegawa, K., 1990e, Proc. 9th SCSS, Vol.2, Bethesda, U.S.A.
- (19) Hasegawa, K., 1990f, Written Contribution, Manoeuvrability Com., ITTC'90, Madrid, Spain.
- (20) Hasegawa, K., 1990g, Proc. 4th ISME Kobe '90, Vol.1, Kobe, Japan.
- (21) Hasegawa, K., 1991b, Proc. Workshop on the use of Marine Simulators in Training and Research, IMSF, Venice, Italy.
- (22) 葛西宏直、1991、第 8 回運動性能研究委員会シンポジウム、日本造船学会運動性能研究委員会、東京。
- (23) 長谷川、藤田陽一、1993a 第 4 回インテリジェント FA シンポジウム、システム制御情報学会、大阪。
- (24) 長谷川、藤田、1993b、関船誌、第 220 号。
- (25) Hasegawa, K., 1993c, Proc. 10th SCSS, Vol.2, Ottawa, Canada.

(26) 長谷川、福田英伸、谷崎 太、1996、関船誌、第 226 号。

(27) Hasegawa, K. 1997, 11th SCSS, Vol.2, Southampton, U.K.

シミュレーションメニュー

シミュレーション実行時間 時間 12 分 0.0

外洋 渡航あり
 京ノ窪瀬戸 指定船のみ渡航
 大阪港(暫港) 全船渡航なし

レーダーおよびデータの表示
 船の自動発生
 グループ化

データをアプロットする時間間隔 (秒) 15.0
 渡航を考慮するエリア半径 (船長) 30.0

渡航指定船 1

船消去

コントロールパネル

シミュレーション時間 [時間] 12.0 [分] 0.0 [秒] 0.0

GATE1 到着待ち時間 [分] 4.0 [秒] 4.0 船番号 1
 GATE2 到着待ち時間 [分] 56.0 [秒] 8.0 船番号 11
 GATE3 到着待ち時間 [分] 719.0 [秒] 57.0

船番号 89 色 レーダー半径 [m] 1.0
 船種 レーダー半徑 2
 船長 L [m] 0.0 レーダー半徑 2
 船幅 B [m] 0.0
 吃水 d [m] 0.0
 計画船速 Vorder [knot] 0.0 出現船数 93
 船速 V [knot] 0.0 +ニアミス 18
 回頭角 YAW [deg] 0.0 +衝突ペア数 5
 航行状態 + 航路逸脱および座礁 3
 渡航対象 事故船数 13
 番号 0 色 通過船数 75
 出合形状

Fig. 8 Control menu of SMARTS

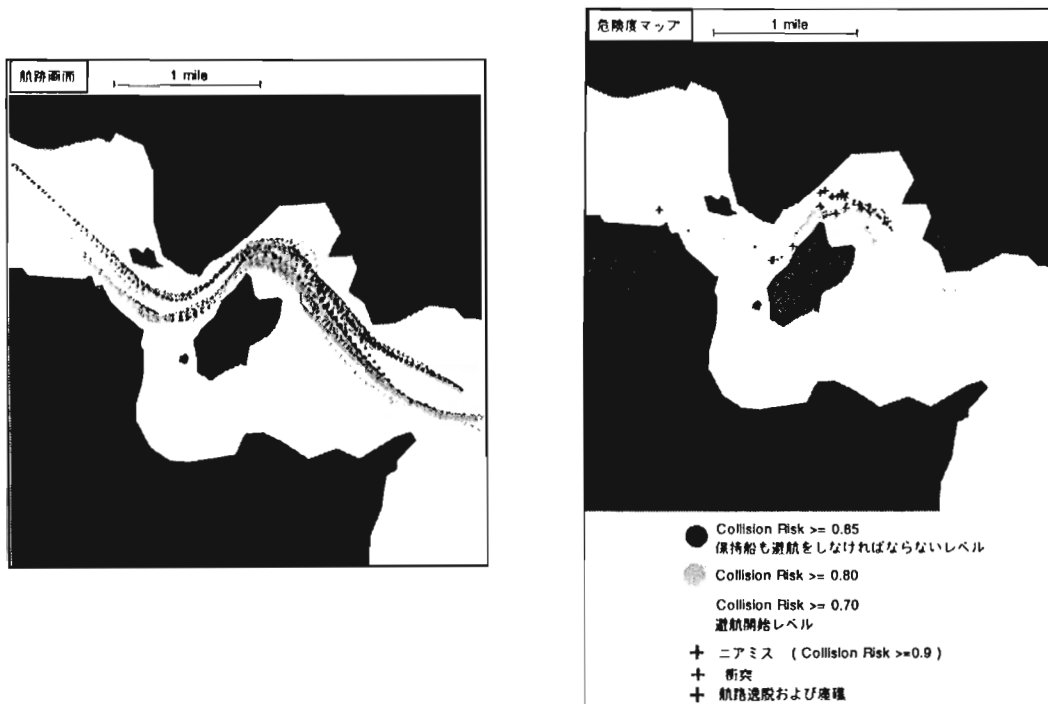


Fig. 9 Sample result of SMARTS implemented new SAFES